



全国普通高等院校土木工程类  
实用创新型系列规划教材



北京高等教育精品教材  
BEIJING GAODENG JIAOYUJINGPIN JIAOCAI

# 结构力学 (上册)

(第二版)

张延庆	主 编
樊友景 刘曙光	副主编
包世华	主 审

科学出版社



北京高等教育精品教材

中国科学院教材建设专家委员会教材建设立项项目

全国普通高等院校土木工程类**实用创新型**系列规划教材

---



(第二版)

# 结构力学(上册)

张延庆	主 编
樊友景 刘曙光	副主编
包世华	主 审

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书分上、下两册。上册主要内容包括绪论、平面体系的几何构成分析、静定结构内力分析、虚功原理和静定结构位移计算、静定结构的影响线、力法、位移法、渐近法与近似法等；下册主要内容包括矩阵位移法、结构的动力计算、结构的稳定计算与结构的极限荷载。

本书可作为高等院校土木工程专业教学用书，亦可供相关专业的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

结构力学. 上册/张延庆主编. —2版. —北京:科学出版社,2011  
全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材  
ISBN 978-7-03-030210-6

I. ①结… II. ①张… III. ①结构力学-高等学校-教材 IV. ①0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 020233 号

---

责任编辑:任加林 / 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行

各地新华书店经销

\*

2006年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年3月第二版 印张:18 1/4

2011年3月第四次印刷 字数:407 000

印数:7 501—10 500

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(骏杰))

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(HA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

## 再版说明

全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材之《结构力学》(上、下册)于2006年初出版,其间于2008年被评为北京高等教育精品教材。《结构力学》(上、下册)教材秉承创新在于实用的理念,在使用中按精品要求审视教材。经过5年多的使用,教材中部分内容需要调整更新。

2010年夏,本教材编者集聚北京工业大学,商讨修订原则与计划:本次修订工作坚持实用创新型系列教材的统一要求,既注意教材本身的系统性,更考虑便于教学使用;既考虑培养学生的分析能力,更注意学生工程素质的培养。

各章开篇增加本章内容概要,更便于自学;上、下册独立成册,适应不同层次的学生;各章各类习题尽量均衡;给出部分典型习题答案。内容上更加注意主次分明,充实基本内容,例题以基本结构形式讲解;精减选修内容,如精简了选修内容三弯矩方程,删减了结构的非线性稳定分析。

为培养学生的分析能力,强调了计算自由度的概念、位移法的解题思路、对称性的利用。为培养学生的工程素养,增加了工程实例图,充实工程结构的简化过程,特别是支座的简化,对反映实际结构性能的弹性支座,在各部分均有交代,在动力计算中分析了单自由度体系强迫振动荷载不作用在质点上的情况。

参加本次修订工作的有北京工业大学的张延庆(第一、二、七、九章)和陈长安(第五、八、十二章和习题答案)、郑州大学的樊友景(第三、四章及第三章习题答案)、东北林业大学的刘晚成(第十、十一章)、内蒙古工业大学的刘曙光(第六章)。

修订过程使我们懂得了追求精品的艰难,幸有导师龙驭球先生的鼓励、科学出版社的支持,让我们按照精品的要求尽力去做。限于现有水平,书中疏漏之处,还望读者和同行批评指正。

张延庆  
2011年1月  
于北京工业大学

## 第一版前言

本书作为全国普通高等院校土木工程类实用创新型系列规划教材之一，根据教育部结构力学教学指导委员会 2004 年年会通过的土木工程专业结构力学教学基本要求、实用创新型系列教材的创意和结构力学在土木工程专业中的位置，由东北林业大学、兰州理工大学、内蒙古工业大学、郑州大学和北京工业大学联合编写完成。

本书注意了实用创新型系列教材的基本原则，吸取以往教学经验和有关教材的长处，保持结构力学基本理论的系统性，内容满足土木工程专业中的各个方向的教学要求；注重教材的实用性，便于学生自学，深入浅出，反映作者在工程结构分析中的新成果；注重对学生能力的培养，理论联系实际，教材内容满足课堂教学精讲精练，课后保证一定的作业量；关注现代科技和市场设计技术的发展，教材内容尽量与相关课程和工程实际相联系。

参加本书编写工作的有东北林业大学的刘晚成（第十、十二章），兰州理工大学的程选生（第八、十二章），内蒙古工业大学的刘曙光、王猛、郝贞洪、吴安利（第二、六、七章），郑州大学的樊友景、李乐（第三、四章），北京工业大学的陈长安（第五章）、张延庆（第一、九章）等。全书由张延庆任主编，樊友景、刘曙光任上册副主编，刘晚成任下册副主编。

担任本书主审的清华大学包世华教授仔细审阅了全书初稿，提出了许多宝贵意见，清华大学龙驭球教授也提出了很好的建议，对此，我们表示衷心感谢。

限于编者水平，书中必定存在缺点错误，希望读者批评指正。

## 主要符号

$A$	面积、振幅
$\mathbf{A}$	振幅向量
$c$	支座广义位移
$C$	弯矩传递系数
$D$	侧移刚度
$E$	弹性模量
$E_P$	结构总势能
$\mathbf{F}$	结点荷载向量, 综合结点荷载向量
$\mathbf{F}^E$	等效结点荷载向量
$F_{Ax}, F_{Ay}$	A 支座沿 $x$ 、 $y$ 方向的反力
$F_{AH}, F_{AV}$	A 支座沿水平、竖直方向的反力
$F_{cr}$	临界荷载
$F_e$	弹性力
$F_H$	拱的水平推力
$F_I$	惯性力
$F_N$	轴力
$F_P$	集中荷载
$F_R$	阻尼力、支座反力、力系合力
$F_Q$	剪力
$F_u$	极限荷载
$\bar{\mathbf{F}}^e$	局部坐标系下的单元杆端力向量
$\mathbf{F}^e$	整体坐标系下的单元杆端力向量
$\bar{\mathbf{F}}^{Fe}$	局部坐标系下的单元固端力向量
$\mathbf{F}^{Fe}$	整体坐标系下的单元固端力向量
$G$	切变模量
$i$	线刚度
$I$	截面二次矩 (惯性矩)、冲量
$\mathbf{I}$	单位矩阵
$k$	刚度系数
$\bar{\mathbf{k}}^e$	局部坐标系下的单元刚度矩阵
$\mathbf{k}^e$	整体坐标系下的单元刚度矩阵
$\mathbf{K}$	结构刚度矩阵
$m$	质量
$M$	力矩、力偶矩、弯矩

$M$	质量矩阵
$M^F$	固端弯矩
$M_u$	极限弯矩
$p$	均布荷载集度
$q$	均布荷载集度
$r$	单位位移引起的广义反力
$R$	广义反力
$S$	转动刚度、截面静矩、影响线量值
$t$	时间
$T$	周期、动能
$T$	坐标转换矩阵
$u$	水平位移
$U$	应变能
$v$	竖向位移
$V$	外力势能
$W$	平面体系自由度、功、弯曲截面系数
$X$	广义未知力
$Z$	广义未知位移
$\alpha$	线(膨)胀系数
$\Delta$	广义位移
$\Delta$	结点位移向量
$\nu$	剪力分配系数
$\delta$	单位力引起的广义位移
$\zeta$	阻尼比
$\theta$	干扰力频率
$\mu$	力矩分配系数
$\sigma_b$	强度极限
$\sigma_s$	屈服应力
$\sigma_u$	极限应力
$\varphi$	角位移, 初相角
$\Phi$	振型矩阵
$\omega$	角频率

# 目 录

## 上 册

再版说明

第一版前言

主要符号

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 结构力学的研究对象与任务 .....	1
1.2 结构的计算简图 .....	2
1.3 结构力学的学习要求与学习方法 .....	7
思考题.....	9
<b>第二章 平面体系的几何构成分析</b> .....	10
2.1 几何构成分析的几个概念.....	10
2.2 几何不变体系构成规律.....	14
2.3 计算自由度.....	16
2.4 几何构成分析示例.....	18
思考题 .....	21
习题 .....	21
<b>第三章 静定结构内力分析</b> .....	25
3.1 截面内力计算及内力图特征.....	25
3.2 多跨静定梁.....	32
3.3 静定平面刚架.....	35
* 3.4 静定空间刚架的计算 .....	52
3.5 三铰拱的受力分析.....	54
3.6 三铰拱的合理轴线.....	59
3.7 桁架结构的内力计算.....	63
3.8 组合结构的内力计算.....	71
3.9 静定结构的特性.....	73
* 3.10 用零载法分析体系的几何构成性质 .....	75
思考题 .....	77
习题 .....	78
<b>第四章 虚功原理和静定结构位移计算</b> .....	85
4.1 有关结构位移计算的几个概念.....	85
4.2 虚功原理.....	87
4.3 单位荷载法——位移计算一般公式.....	92



4.4	荷载作用下的位移计算	93
4.5	图乘法	97
4.6	静定结构由于温度改变引起的位移计算	105
4.7	静定结构由于支座移动引起的位移计算	106
4.8	线弹性体系的互等定理	109
	思考题	111
	习题	112
<b>第五章</b>	<b>静定结构的影响线</b>	<b>118</b>
5.1	影响线的定义、静力法作简支梁的影响线	118
5.2	静力法作伸臂梁和多跨静定梁的影响线	121
5.3	用机动法作影响线	124
5.4	间接荷载作用下的影响线	127
5.5	桁架的影响线	129
5.6	利用影响线求量值和最不利荷载位置	132
5.7	铁路和公路的标准荷载制、换算荷载	139
* 5.8	简支梁的包络图和绝对最大弯矩	145
	思考题	149
	习题	149
<b>第六章</b>	<b>力法</b>	<b>154</b>
6.1	超静定结构及超静定次数的确定	154
6.2	力法的基本概念与力法的典型方程	158
6.3	力法的计算步骤和示例	162
6.4	对称性的利用	173
6.5	超静定结构的位移计算	179
6.6	超静定结构支座移动的内力计算	182
6.7	超静定结构温度变化时的计算	187
6.8	内力图的校核	189
6.9	力法计算超静定拱	191
* 6.10	超静定结构的影响线作法概述	202
* 6.11	交叉梁结构的计算	205
6.12	超静定结构的特性	206
	思考题	207
	习题	208
<b>第七章</b>	<b>位移法</b>	<b>214</b>
7.1	位移法基本概念	214
7.2	超静定杆件的杆端力	218
7.3	位移法基本方程	222
7.4	连续梁 无侧移刚架	225
7.5	有侧移刚架	229

7.6 对称性的利用 .....	234
7.7 支座移动时的计算 .....	235
7.8 温度变化时的计算 .....	237
思考题 .....	239
习题 .....	239
<b>第八章 渐近法与近似法</b> .....	<b>243</b>
8.1 力矩分配法的概念 .....	243
8.2 力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架 .....	246
8.3 力矩分配法和位移法的联合应用 .....	253
8.4 无剪力分配法 .....	255
* 8.5 分层法 .....	260
* 8.6 反弯点法 .....	263
思考题 .....	266
习题 .....	266
<b>结构力学 (上册) 部分习题答案</b> .....	<b>270</b>

## 下 册

<b>第九章 矩阵位移法</b> .....	<b>277</b>
9.1 矩阵位移法解题思路 .....	277
9.2 单元分析——局部坐标系 .....	278
9.3 单元分析——整体坐标系 .....	283
9.4 整体分析——刚度矩阵的组集 .....	286
9.5 整体分析——边界条件的处理 .....	292
9.6 等效结点荷载 .....	295
9.7 计算步骤和算例 .....	299
9.8 几点补充说明 .....	308
思考题 .....	310
习题 .....	310
<b>第十章 结构的动力计算</b> .....	<b>315</b>
10.1 静荷载和动荷载 .....	315
10.2 动力计算中结构体系的自由度 .....	317
10.3 单自由度体系的自由振动 .....	319
10.4 单自由度结构在简谐荷载下的强迫振动 .....	326
10.5 单自由度结构在任意荷载下的强迫振动 .....	334
10.6 多自由度结构的自由振动 .....	337
10.7 多自由度结构在简谐荷载作用下的强迫振动 .....	349
10.8 振型分解法 .....	355
10.9 无限自由度体系的自由振动 .....	360
10.10 自振频率和振型的近似计算方法 .....	363

思考题	372
习题	372
<b>第十一章 结构的稳定计算</b>	375
11.1 结构的稳定性及分析特点	375
11.2 用静力法确定临界荷载	379
11.3 用能量法确定临界荷载	382
11.4 任意边界条件压杆的解析方法	388
11.5 弹性支撑压杆的稳定方程	394
11.6 剪力对临界荷载的影响	398
11.7 组合压杆的稳定	400
* 11.8 圆环及拱的稳定	403
* 11.9 窄条梁的稳定	406
思考题	408
习题	408
<b>第十二章 结构的极限荷载</b>	411
12.1 弹性设计与塑性设计	411
12.2 静定梁的极限荷载	412
12.3 单跨超静定梁的极限荷载	414
12.4 比例加载时有关极限荷载的几个定理	416
12.5 计算极限荷载的穷举法和试算法	418
12.6 连续梁的极限荷载	420
* 12.7 刚架的极限荷载	422
思考题	429
习题	429
<b>结构力学 (下册) 部分习题答案</b>	432
<b>主要参考文献</b>	435

# 第一章 绪 论

结构力学是一门技术基础课,是研究土木工程结构的力学性能的学问。

本章主要介绍结构力学的研究对象、研究内容、结构的计算简图等问题。其中结构的计算简图是本章的重点内容。

## 1.1 结构力学的研究对象与任务

### 1.1.1 结构

所谓结构,是指工程建筑物及设施中承受荷载起骨架作用的部分,如房屋建筑中的梁柱体系(图 1.1),道路工程中的桥梁(图 1.2)和隧洞,水利工程中的水坝和渡槽(图 1.3)等。

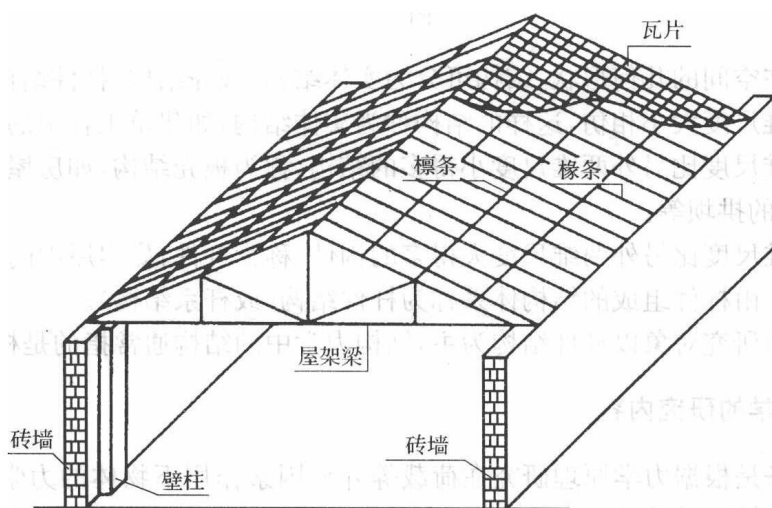


图 1.1

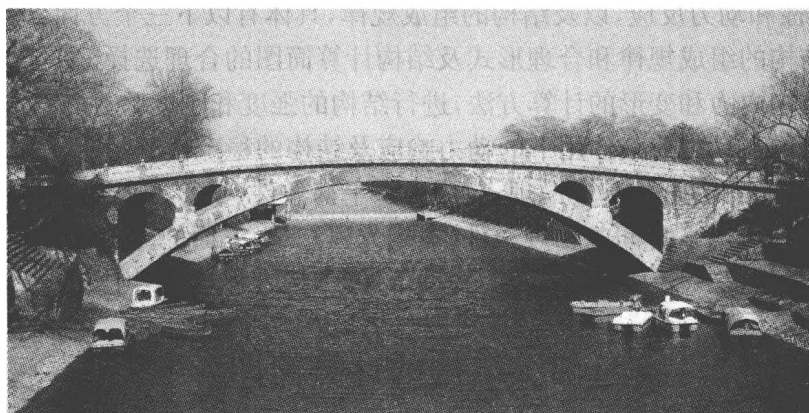


图 1.2



图 1.3

根据结构在空间的几何形状,结构可分为实体结构、板壳结构、杆件结构三类。

结构的三维尺度大小相仿,这样的结构称为实体结构,如建筑工程中的基础等。

结构的一维尺度比另外两维尺度小得多的结构,称为板壳结构,如房屋中的楼板和屋盖、水工建筑中的拱坝等。

构件的一维尺度比另外两维尺度大得多的构件,称为杆件,如房屋中的梁、柱,桥梁和隧洞中的拱等。由杆件组成的结构体系称为杆件结构(或杆系结构)。

结构力学的研究对象以杆件结构为主,结构力学中的结构通常指的是杆件结构。

### 1.1.2 结构力学的研究内容

力学的任务是根据力学原理研究在荷载等外界因素作用下物体的力学性能,如理论力学讨论物体机械运动的基本规律,材料力学讨论构件的强度、刚度、稳定性等问题。

结构力学的任务是研究在荷载等外界因素作用下结构的内力和变形,讨论结构的刚度、刚度、稳定性和动力反应,以及结构的组成规律,具体有以下三个方面:

- 1) 讨论结构的组成规律和合理形式及结构计算简图的合理选择。
- 2) 讨论结构内力和变形的计算方法,进行结构的强度和刚度验算。
- 3) 讨论结构在动力荷载作用下的动力响应及结构的稳定性。

结构力学将根据力学的基本原理,应用力系平衡条件(平衡方程)、运动和变形连续条件(几何方程)、应力与变形间的物理条件(本构方程)三个方面的内容,主要在理论上分析结构的上述力学性能。应力与变形间的物理条件(本构方程)由结构实验获得。

## 1.2 结构的计算简图

实际工程中的结构很复杂,不可能,也不必要完全按照结构的真实情况进行力学分

析。在对实际结构进行力学计算以前应对结构加以分析,抓住主要特征,略去次要因素,用一个简化的图形来代替实际结构,这种简化了的图形称为结构的计算简图。对实际工程结构进行简化,使计算简图能反映实际结构的主要性能,同时便于计算,是力学分析的基础、工程应用的关键。

在结构计算中,一般假设构件的材料为连续的、均匀的、各向同性的、完全弹性的或弹塑性的。上述假设在小变形条件下,对于金属材料是符合实际情况的,对于混凝土、砖石等材料近似满足,对于木材等具有纹理性质的材料,有较大误差。

选取计算简图除要在材料方面进行上述简化外,还需要在结构和荷载两个方面进行简化。

### 1.2.1 结构的简化

一般结构都是空间结构,各部分相互连接成为一个空间体系,以承受各个方向的荷载。在多数情况下,常忽略一些次要的空间约束而将实际结构分解为平面结构,或将结构简化到特征面上讨论,使计算得以简化。结构力学主要讨论平面结构的计算问题,对一些结构具有明显空间特征不宜简化成平面问题的空间结构,本教材做一简略介绍。

#### 1. 杆件的简化

杆件的截面尺寸(宽度、高度)一般比杆件长度小得多,截面上的应力可以根据截面的内力(弯矩、轴力、剪力)来确定。因此,在计算简图中,杆件用其轴线表示,杆件之间的连接区用结点表示,杆长用结点间的距离表示,而荷载的作用点也平移到轴线上。当截面尺寸较大时(超过长度的 $1/4$ ),这种简化存在有较大误差。

#### 2. 杆件间连接的简化

杆件间的连接区简化为结点。结点通常简化为以下两种形式:

1) 刚结点。如图 1.4(a)所示现浇钢筋混凝土梁柱连接点,被连接的杆件在连接处既不能产生相对移动,也不能相对转动,即杆件间不仅可以传递力,也可以传递力矩。这种情况可简化为图 1.4(b)所示的刚结点。

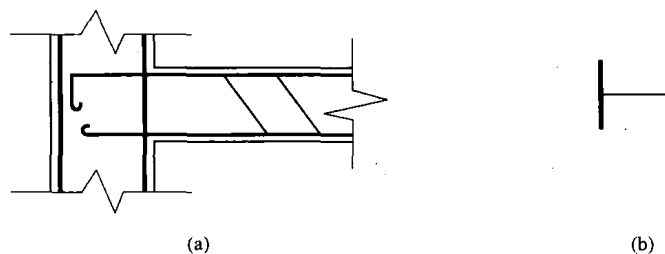


图 1.4

2) 铰结点。如图 1.5(a)所示的木屋架的连接点,被连接的杆件在连接处不能产生相对移动,可以发生微小的相对转动,即杆件间只能传递力,不能传递力矩。这种情况可简化为图 1.5(b)所示的铰结点。此外预制钢筋混凝土构件的连接及钢结构的栓结一般也简化为铰结点。铰结点是一种理想情况,分析简便,一般能满足工程误差要求。

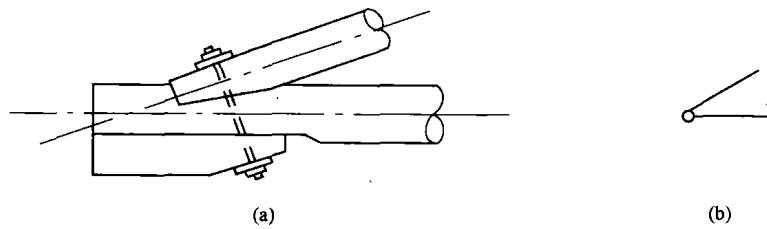


图 1.5

### 3. 结构与基础间连接的简化

结构与基础的连接区简化为支座。按其受力特征,一般简化为以下四种情形:

1) 固定支座。结构被基础完全固定[图 1.6(a)],结构既不能移动,也不能转动,基础对结构施加三个约束反力  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $M$ 。在计算简图中可按图 1.6(b)表示。

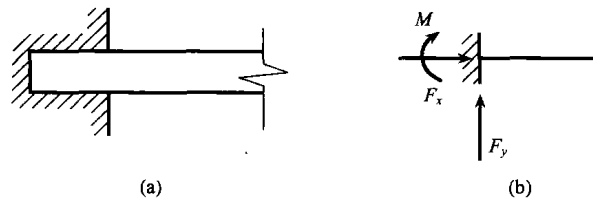


图 1.6

2) 铰支座。结构被支撑的部分相对基础不能移动,但可以转动,基础能提供两个反力  $F_x$ 、 $F_y$ 。在计算简图中用两根相交的支杆表示(图 1.7)。

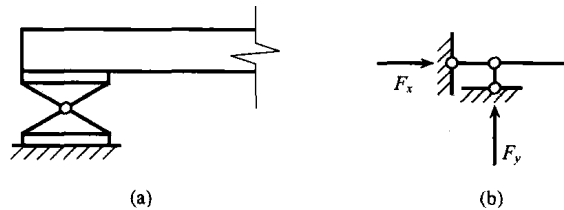


图 1.7

3) 滚轴支座。结构被支撑的部分相对基础可以转动和水平移动,不能竖向移动,基础所提供的反力只有竖向反力  $F_y$ 。在计算简图中用一根支杆表示(图 1.8)。

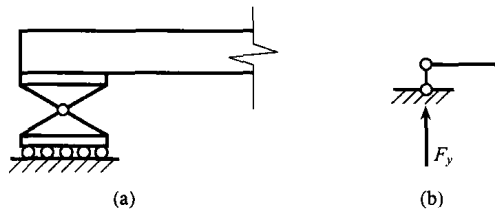


图 1.8

4) 定向支座。结构被支撑的部分相对基础不能转动,但可沿一个方向平行滑动,基础只能提供反力矩  $M$  和一个反力  $F_y$ 。在计算简图中用两根平行支杆表示(图 1.9)。

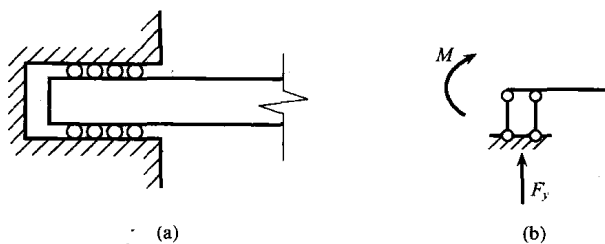


图 1.9

在实际结构中,如果基础的约束能力达不到上述理想状态,在被限制的方向上仍可产生部分位移,且约束反力与位移量有关,构成弹性支座。

### 1.2.2 结构的分类

根据上述简化选取结构的计算简图,杆件结构可分为下列几类:

- 1) 梁。如图 1.10(a)所示,梁是一种可以承受横向荷载、其轴线为直线的受弯构件。
- 2) 拱。如图 1.10(b)所示,拱的轴线为曲线,其力学特点是在竖向荷载作用下有水平支座反力(推力),截面内既有弯曲内力,也有轴向力。
- 3) 桁架。桁架是由直杆组成的体系,所有结点都为铰结点,如图 1.10(c)所示,各杆件内只有轴向力。
- 4) 刚架。刚架也是由直杆组成的,其结点通常为刚结点,如图 1.10(d)所示。
- 5) 组合结构。组合结构是桁架和梁或刚架组合在一起形成的结构形式,如图 1.10(e)所示。

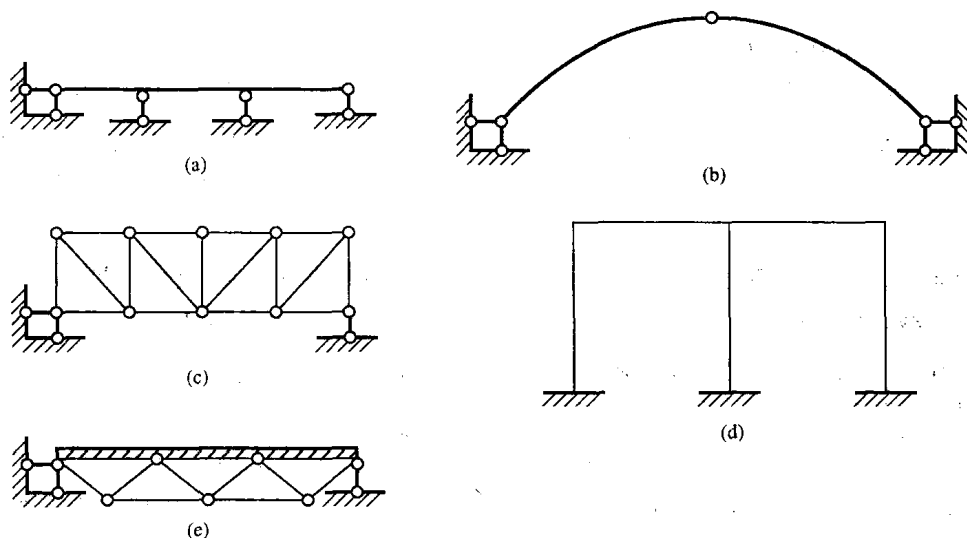


图 1.10

杆件结构可分为平面结构和空间结构两类。在平面结构中,各杆的轴线和外力的作用线都在同一平面内,如图 1.11 所示为一平面结构的桁架。若各杆轴线和外力作用线不在同一平面内,则为空间结构,图 1.12 所示即为一空间刚架。大多数结构在设计中通常是按平面结构进行计算的。在有些情况下,必须考虑结构的空间效应。



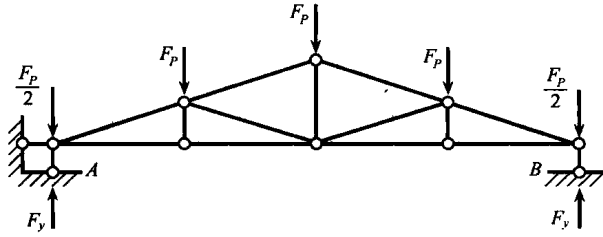


图 1.11

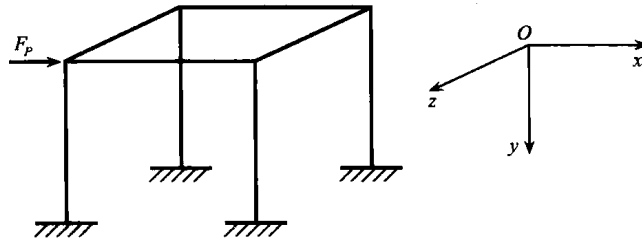


图 1.12

除上述分类外,按计算方法,结构又可分为静定结构和超静定结构。如果结构的杆件内力(包括反力)可由平衡条件唯一确定,则此结构称为静定结构。如果杆件内力由平衡条件还不能唯一确定,而必须同时考虑变形条件才能唯一确定,则此结构称为超静定结构。

### 1.2.3 荷载的简化及分类

荷载是主动作用于结构的外力,如结构的自重、上部物体的重量等。

结构承受的荷载可分为体积力和表面力两大类。体积力指的是其他物体作用于结构中每点的力,如自重、惯性力等;表面力则是由其他物体通过接触面传递给结构的作用力,如水压力、车辆的车轮压力等。在杆件结构中把杆件简化为轴线,因此不管是体积力还是表面力都应简化为作用在杆件轴线上的力。荷载按其分布情况可简化为集中荷载和分布荷载。

根据荷载作用在结构上的时间,可以分为恒载和活载两类。恒载是长期作用在结构上的不变荷载,如结构的自重或土压力。活载是指在建筑物施工和使用期间短期存在的荷载,如楼面荷载、吊车荷载、风荷载和雨雪等屋顶荷载等。

根据荷载作用在结构上的位置,荷载分为固定荷载和移动荷载。进行结构计算时,恒载和大部分活载(如雪荷载、风荷载)在结构上作用的位置可以认为是固定的,这种荷载称为固定荷载;有些活载在结构上的位置是移动的,如吊车梁上的吊重、桥梁上的车辆,这种荷载称为移动荷载。

根据荷载作用引起结构的反应,可以分为静力荷载和动力荷载。静力荷载的量值、方向和位置不随时间变化或变化极为缓慢,不使结构产生显著的加速度,因而惯性力的影响可以忽略。动力荷载是随时间迅速变化或在短暂时段内突然作用或消失的荷载,使结构产生显著的加速度,因而惯性力的影响不能忽略。结构的自重和其他恒载是静力荷载。动力机械运转时产生的荷载或冲击波的压力是动力荷载的例子。车辆荷载、风载和地震